

# اصول و کاربردهای چسبندگی مارمولکی در سیستم‌های رباتیک و گریپرها

مهدی مدبری فر

استادیار دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

m-modabberifar@araku.ac.ir

## چکیده

پژوهشگرانی که در پی توسعه توانایی‌های ربات‌های قابل حرکت بوده‌اند، همواره نگاهی به سیستم‌های زیستی نیز داشته و از آنها الهام گرفته‌اند. مارمولک از جمله مخلوقات چابکی است که به‌طور قابل توجهی قدرت مانور و حرکت ماهرانه بر روی سطوح تخت و عمودی دارد. حتی بعضی از گونه‌های مارمولک توانایی بالارفتن و حرکت روی سطوح معکوس مانند سقف را هم دارند. مطالعه سیستم چسبندگی پاهای مارمولک منجر به طراحی چسبنده‌های ترکیبی مصنوعی در سال‌های اخیر شده است. یک ساختار چسبندگی مارمولکی طبیعی براساس جهت عمل کرده و مارمولک را قادر می‌سازد چسبندگی پاهایش را با انواع سطوح تنظیم کند. این مقاله پس از مرور تاریخچه فناوری چسبندگی مارمولکی به روش‌های ساخت این چسبنده‌ها پرداخته و کاربردهای آن را در انواع سیستم‌های رباتیک و گریپرها بررسی می‌کند. چسبندگی بدون استفاده از انرژی در این گریپرها کاربری آنها را در مکان‌های خاص مانند ربات‌های اکتشاف فضایی یا ایستگاه‌ها و سفینه‌های فضایی جذاب می‌کند.

## واژگان کلیدی

چسبندگی مارمولکی  
گریپر  
چسبندگی جهت‌دار  
ربات صعودکننده  
رشته‌های چسبنده

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۱۱  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۲۸

## ۱ مقدمه

دانشمندان سالیان متمادی توانایی و قابلیت حرکت جانوران گوناگون را برای درک بهتر سیستم‌های حرکتی آنها مطالعه کرده‌اند. بسیاری از وسایل نقلیه و سیستم‌های حمل‌ونقل با استفاده از ایده‌هایی برگرفته از طبیعت ساخته و استفاده شده‌اند. علاوه بر قابلیت حرکت جانوران، دیگر سیستم‌های مورد استفاده آنها مانند پرواز، ردیابی و ذخیره انرژی نیز از موضوعات جذاب برای دانشمندان بوده است. از دیگر مثال‌های موجود می‌توان به طراحی زیردریایی‌ها براساس طرح و شکل بدنه کوسه و دلفین و انواع ربات‌های الهام‌گرفته از حشرات مانند سنجاقک و سوسک اشاره کرد. از جمله پدیده‌های زیستی جالب توجه برای دانشمندان نحوه چسبندگی و حرکات موجوداتی مانند حشرات و مارمولک‌ها برای روی سطوح عمودی و معکوس بوده است. روش‌های متنوعی برای چسبیدن موجودات زنده روی سطوح عمودی وجود دارد. این روش‌ها از ترشح مواد چسبنک در مورچه‌ها، حلزون‌ها و کرم‌ها تا پنجه‌های تیز گربه‌ها و چسبندگی خشک پاهای مارمولک را شامل می‌شود. با الهام از این روش‌ها می‌توان به پیشرفت‌های شگرفی در حوزه دانش و فناوری رسید.

در این مقاله موضوع چسبندگی خشک<sup>۱</sup> مورد استفاده در مارمولک‌ها برای بالارفتن روی سطوح عمودی مورد توجه قرار گرفته و با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، به معرفی انواع سیستم‌های رباتیک و گریپر جدید با استفاده از چسبندگی مشابه چسبندگی مارمولکی پرداخته می‌شود. در ادامه، اصول چسبندگی و فعالیت‌های پژوهشی انجام‌شده مرور می‌شود.

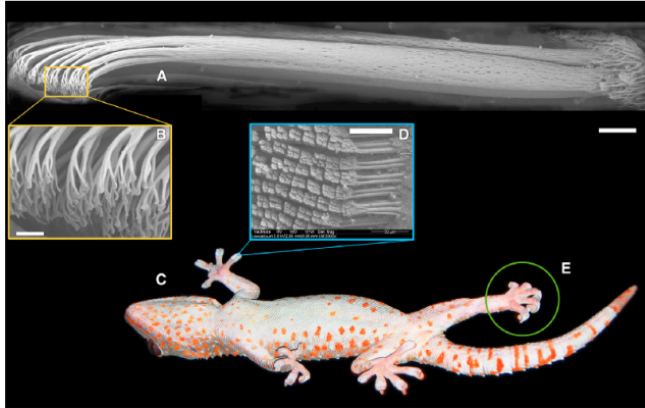
## ۲ نیازمندی‌ها و اصول چسبندگی برای بالارفتن از

### سطوح عمودی

برای فهم نیازمندی‌های چسبندگی جهت بالارفتن از دیوارهای عمودی، عمل بالارفتن یا صعود به سه فاز تقسیم می‌شود: فاز اول اتصال است که شامل اتصال<sup>۲</sup>، فرارگیری و بارگذاری چسبنده روی سطح مورد نظر است. فاز بعدی ایستایی<sup>۳</sup> است که چسبنده باید تماس خود را با سطح حفظ کند تا بالارونده مرکز جرم خود را به سمت بالا حرکت دهد. فاز نهایی جداشدن<sup>۴</sup> است که چسبنده اتصال خود را با سطح قطع می‌کند تا بتواند این سیکل حرکتی را در نقطه‌ای بالاتر ادامه دهد. هر کدام از این فازها نیازمندی‌های خاصی از لحاظ مواد چسبنده و روش اجرا می‌طلبد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. در طول اتصال، یک چسبنده باید با سطح منطبق باشد تا یک چسبندگی قوی را تأمین کند. تعدادی از سطوح زبری دارند که باعث می‌شود سطح واقعی تماس متفاوت از سطح ظاهری آن باشد. این وضعیت سبب کاهش سطح واقعی تماس شده و در برخی موارد باعث عدم کارایی چسبندگی می‌شود. مثلاً برای نیروهای واندروالسی سطح جدایش مورد نیاز برای چسبندگی در حد نانومتر است. نیروهای مغناطیسی، الکترواستاتیک و مکش با افزایش فاصله بین سطوح کاهش ناگهانی دارند. بنابراین یک چسبندگی برای صعود باید با پستی و بلندی‌های سطح منطبق شود و خودش را طوری همراستا کند که درصد بالایی از مساحت آن با سطح مورد نظر برای بالارفتن منطبق باشد. این امر با استفاده از مواد نرمی که قابلیت تغییر شکل و انطباق با پستی و بلندی‌های سطوح مورد نظر برای صعود را داشته باشند، امکان‌پذیر است.

<sup>1</sup>dry adhesion <sup>2</sup>attachment <sup>3</sup>stance <sup>4</sup>detachment

در صعود هستند. بیش از ۵۰۰ گونه مارمولک روی کره زمین وجود دارد، اما گونه توکی<sup>۵</sup> یکی از بزرگترین هاست و بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این گونه به دلیل ساختار پیچیده پاها و فیزیولوژی خاص موهای آن شناخته شده است. شکل ۲ یک نمونه مارمولک توکی و ساختار پاها و موهای آن را نشان می‌دهد.



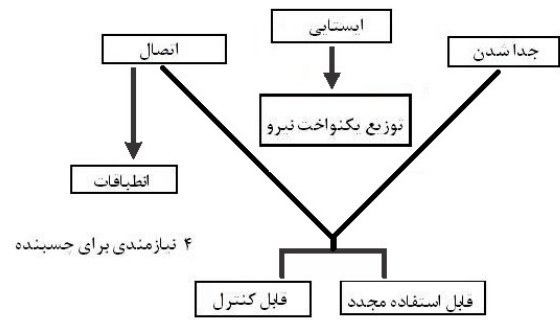
شکل ۲: سیستم چسبندگی مارمولک توکی؛ (A) تصویر بزرگنمایی شده از یک تار موی اصلی<sup>۱</sup>، (B) سرهای صدها رشته نازک مو<sup>۱</sup>، (C) نمای اصلی مارمولک روی یک شیشه، (D) ردیف‌های تار موهای اصلی در یک الگوی شبکه‌ای، (E) پنجه در حین جداسدن از سطح [۳]

### ۱.۳ سازوکار چسبندگی مارمولک

سازوکار چسبندگی پاهای مارمولک سالیان زیادی یکی از موضوعات بحث‌برانگیز علمی بوده است. قفل شدن تداخلی، مکش، الکترواستاتیک، نیروهای موئین و نیروهای بین مولکولی از جمله فرضیه‌های مطرح برای نیروی چسبندگی پاهای مارمولک بودند. قفل شدن تداخلی فرضیه‌ای متداول‌تر بود [۱]، اما این فرضیه با مشاهده حرکت مارمولک روی سطح صاف شیشه و دانسته شدن این موضوع که المان‌های پاهای مارمولک آن قدر بزرگ هستند که وارد هیچ ناهمواری سطح شیشه نمی‌شوند، به کنار گذاشته شد [۲]. آزمایشاتی که در خلأ انجام گرفتند نشان دادند که مکش نمی‌تواند سازوکار چسبندگی پاهای مارمولک باشد و آزمایشات بیشتر نیز فرضیه نیروی الکترواستاتیک را برای سازوکار چسبندگی پاهای مارمولک رد کردند. آزمایشات متعدد اولیه‌ای که روی مواد با انرژی‌های سطحی مختلف انجام گرفتند فرضیه وجود نیروهای واندروالس را برای ایجاد چسبندگی مارمولکی تقویت کردند، اما تا اوایل قرن ۲۱ که تأیید شد نیروهای واندوالسی سازوکار غالب در چسبندگی مارمولکی است [۳]، این فرضیه اثبات نشد. آتمن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۲) نیروهای چسبندگی یک موهای پای یک مارمولک را روی دو صفحه ویفر نیمه‌هادی اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که نیروهای واندروالسی سازوکار چسبندگی در ساختارهای رشته‌مانند تار موهای مارمولک است [۴].

### ۲.۳ آناتومی و فیزیولوژی پای مارمولک

پاهای مارمولک ساختار پیچیده‌ای دارد که به آن امکان می‌دهد که روی ساختارهای پیچیده طبیعی مانند سنگ و صخره راه برود [۵]. ساختار



شکل ۱: نیازمندی‌هایی که برای یک چسبندگی جهت صعود لازم است

با برقراری تماس، صعودکننده وارد فاز ایستایی می‌شود که در آن با تکیه بر چسبندگی جهت باقی‌ماندن در تماس ایستایی با دیوار، مرکز جرم خود را بالا می‌کشد. جهت حصول این هدف، نیروهایی که روی چسبندگی قرار می‌گیرد باید در سطح تماس توزیع شوند. هرگونه جداسدن لبه‌هایی جلویی یا عقبی مساحت تماس منجر به کنده شدن از دیوار می‌شود. اگر یک چسبندگی صعودکننده دارای حداکثر توانایی چسبندگی در واحد مساحت باشد، آنگاه سناریوی ایده‌آل در فاز ایستایی این است که توزیع تنش در سطح تماس به‌گونه‌ای باشد که هیچ نقطه‌ای از ماکزیمم تنش چسبندگی تجاوز نکند. برای داشتن بهترین عملکرد، کل سطح تماس باید به‌طور مساوی تحت تنش نزدیک به ماکزیمم تنش چسبندگی ذکر شده قرار گیرد. نیروی برگشت فتری سطح تماسی باید در توزیع نیرو نیز در نظر گرفته شود. در اکثر موارد برای به حداکثر رساندن سطح تماسی چسبندگی و قطعه به پیش - نیرو<sup>۱</sup> نیاز است. وقتی تماس برقرار می‌شود و نیروهای چسبندگی کار خود را شروع می‌کنند، تغییر شکل‌های الاستیکی که برای افزایش سطح تماس چسبندگی و سطح اعمال شده بود به دلیل خاصیت برگشت فتری<sup>۲</sup> که دارند خلاف نیروی چسبندگی عمل می‌کنند. این نیروهای برگشت فتری باید از نیروی چسبندگی کوچکتر باشد؛ زیرا در غیر این صورت سبب جدایش سطح چسبندگی و قطعه می‌شوند. سومین و چهارمین نیازمندی‌های یک صعود در خاصیت سیکی بالارفتن رخ می‌دهد. چون یک صعودکننده به‌طور متوالی در سیکل اتصال - ایستایی - جداسدن قرار می‌گیرد، چسبندگی آن باید استحکام کافی در مقابل نیروهای سیکی را داشته باشد. این خاصیت را می‌توان به قابلیت استفاده مجدد<sup>۳</sup> خلاصه کرد. یک مشخصه که می‌تواند به قابلیت استفاده مجدد یک چسبندگی کمک کند، کنترل است. اگر خواص چسبندگی ماده توانایی قطع و وصل شدن توسط صعودکننده را داشته باشد، می‌تواند منجر به کاهش نیروهای زیادی شود که در فاز جداسدن همچنان حضور دارند. توانایی کنترل<sup>۴</sup> چسبندگی به صعودکننده اجازه می‌دهد که فقط در فازهای اتصال و ایستایی چسبندگی باشد و برای جداسدن از یک سطح در یک حالت غیرچسبندگی به کمترین نیرو و انرژی نیاز داشته باشد.

### ۳ پیشینه پژوهش

چه موجودی در طبیعت بهترین صعودکننده است؟ در حالی که میمون و گربه ممکن است بزرگترین بالارونده‌ها باشند، یک باکتری یا تک‌سلولی کوچکترین باشد، حشرات بیشترین تعداد باشند، اما مارمولک‌ها سریعترین موجود زنده

<sup>1</sup>preload <sup>2</sup>spring back <sup>3</sup>reusability <sup>4</sup>controllability <sup>5</sup>tokay

<sup>6</sup>Seta <sup>7</sup>Spatula <sup>3</sup>Autumn

۱۰۰۰ شاخه تار موی فرعی<sup>۳</sup> دیگر منتهی می‌شود. تار موهای فرعی منشعب از ساقه اصلی مو به شکل مثلی است و از ۱۵۰ نانومتر تا ۲۷۵ نانومتر عرض دارند، ضمناً ضخامت آنها تقریباً ۱۰ نانومتر می‌باشد [۱۰].

### ۳.۳ مکانیک سیستم چسبندگی مارمولک

مکانیک سیستم پیچیده چسبندگی مارمولک آسان نیست، اما در سال‌های اخیر مطالعات در این زمینه پیشرفت‌های خوبی داشته است. مشاهدات مارمولک در مقیاس ماکرو نشان‌دهنده کشیده شدن زیاد انگشتان پای مارمولک جهت کنده شدن انگشت پنجه از دیوار قبل از جدا شدن است [۱۱]. در مقیاسی کوچکتر حسگرهای میکروالکترومکانیکی<sup>۴</sup> نشان دادند که تار موهای اصلی پاهای مارمولک بدون پیش نیروی مناسب که شامل یک مولفه به موازات دیوار باشد، نیروی قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. تست‌های انجام شده روی یک تار موی مارمولک نشان دادند که با بارگذاری به موازات دیوار بعد از اولین تماس، نیروی چسبندگی ده برابر افزایش یافت [۳]. آزمایشات بعدی نشان دادند که تار موی مارمولک دارای یک حالت غیرچسبنده است، زیرا به هیچ سطحی نمی‌چسبد، مگر آنکه نیروی پیش بار به موازات دیوار به آن اعمال شود [۱۲]. این رفتار از درگیر شدن تصادفی پاها با سطوح یا ذرات ناخواسته جلوگیری می‌کند و می‌تواند یک مزیت تکاملی برای حیوانات باشد. چسبندگی تابع جهت در آزمایشات بعدی که روی تمام اندام مارمولک، انگشتان مارمولک و ردیف‌های تار موهای مارمولک انجام گرفت بیشتر شناخته شد [۱۳]. تمام این نتایج نشان دادند که نیروی کنده شدن از سطح به مقدار زیادی به جهت و میزان نیروی پیش بار بستگی دارد. یک مدل به نام چسبندگی جهت‌دار<sup>۵</sup> شکل گرفت که با اطلاعات مارمولک همخوانی نزدیکی داشت. این مدل با داده‌های اضافی که شامل یک مدل سنتی تماس‌های چسبنده براساس تئوری و آزمایشات جانسون<sup>۶</sup>، کندال<sup>۷</sup> و رابرت<sup>۸</sup> (JKR) [۱۴] و مدل کنده شدن کندال [۱۵] می‌باشد، در شکل ۴ نمایش داده شده است. مدل‌های ارائه شده در اینجا به صورت منحنی‌های دوبعدی در فضای نیرو هستند [۱۶]. ترکیب‌های نیروی برشی و نرمال که در محدوده‌های سایه‌خورده این منحنی هستند ایمن بوده و تماس بین سطوح حفظ خواهد شد، در حالی که خود منحنی بیانگر نقاط عدم کارایی است که در آنها ترکیب نیروها منجر به جدایش خواهد شد. دو تفاوت مهم بین این مدل‌هاست:

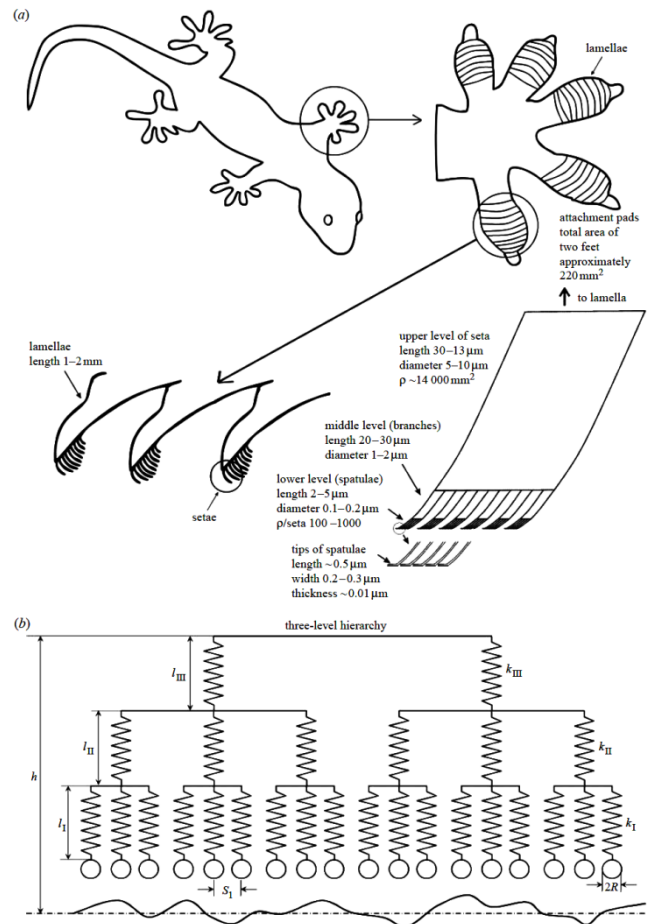
الف) با اضافه شدن نیروی برشی به این مدل‌ها، چسبندگی پایدار برای مدل چسبندگی جهت‌دار افزایش می‌یابد، اما این نیرو در مدل JKR کاهش

می‌یابد

ب) مدل چسبندگی جهت‌دار مبدا را قطع می‌کند، که این نشانگر آن است که در نیروی برشی صفر تماس با سطح می‌تواند بدون هیچ نیروی دیگری قطع شود. این دو خاصیت مسئول توانایی مارمولک برای کنترل چسبندگی‌اش است که در بخش قبلی به‌عنوان یکی از نیازمندی‌ها مطرح شد. یک مارمولک در زمان فاز اتصال و ایستایی، با پایین کشیدن دیوار عمودی می‌تواند از سطح بالای چسبندگی با دیوار مطمئن شود. با قطع نیروی برشی، که همان وزن مارمولک می‌باشد، پاهای مارمولک با نیروی بسیار اندکی و با سرعت زیادی از دیواره جدا

لایه‌لایه‌ای پای مارمولک در چندین مقیاس طولی عمل کرده و به کوچکترین المان‌های آن اجازه می‌دهد با یک سطح در فاصله اتمی به‌طور مجزا تماس پیدا کند. این ساختار لایه‌لایه‌ای همچنین به توزیع نیرو کمک می‌کند و تمرکز تنش‌هایی را که ممکن است سبب جدا شدن در بعضی نقاط شود را محدود می‌نماید. در بزرگترین اندازه طولی، انگشتان پنجه‌های مارمولک به‌عنوان المان‌های چسبنده عمل می‌کنند. رگ‌های خونی قابل انطباق با سطوح به‌عنوان یک بالش هیدرواستاتیک عمل کرده و المان‌های سطحی ساختار چسبنده را حمایت می‌کنند، در حالی که در طول موج بزرگتری از تغییرات در سطوح منطبق می‌شوند [۶].

ساختارهای آویزان لایه‌ای به نام لملا<sup>۱</sup> امکان انطباق با سطوح در مقیاس میلی‌متر را می‌دهد. هر مارمولک توکی معمولاً ۲۰ لایه در هر انگشت پنجه دارد (شکل ۳) [۷].

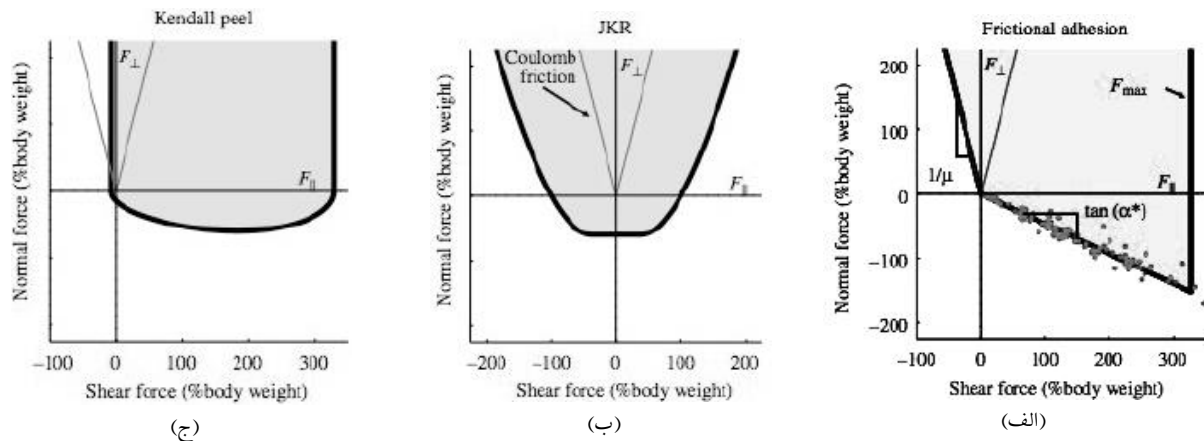


شکل ۳: مشخصات ساختار لایه‌ای و سلسله‌مراتبی موهای انگشتان پنجه مارمولک و مدل فنری سه سطحی معادل آن [۱۰]

ساقه‌های اصلی موی<sup>۲</sup> پاهای مارمولک این لایه‌ها را با چگالی ۱۴۴۰۰ در هر میلی‌متر مربع پوشش می‌دهند که چگالی آن در نزدیکی کف پنجه بیشتر از نوک آن است [۸]. هر ساقه تار مو اصلی تقریباً ۱۰۰ میکرومتر طول و ۵ میکرومتر قطر دارد [۹] اما این اندازه در طول انگشت پنجه متغیر است. تار موی اصلی معمولاً در نزدیکی نوک انگشت پنجه و نزدیک به پایه لملا نازکتر و کوتاه‌تر هستند. تار موهای اصلی رشته‌های مستقیمی نیستند و نوک آنها دارای انحنايي به سمت کف پنجه دارد. نوک هر ساقه اصلی به ۱۰۰ تا

<sup>1</sup>lamellae <sup>2</sup>Seta <sup>3</sup>Spatula <sup>4</sup>MEMS <sup>5</sup>directional adhesion

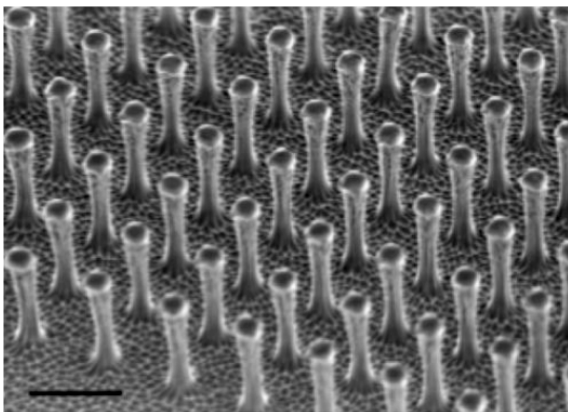
<sup>6</sup>Johnson <sup>7</sup>Kendall <sup>8</sup>Roberts



**شکل ۴:** نمایشی از (الف) مدل چسبندگی اصطکاکی دارای قابلیت چسبندگی افزایشی با اعمال نیروی برشی در راستای مطلوب است. نقطه قطع این منحنی با مبدأ نشان دهنده آن است که ماده چسبنده بدون اعمال هیچ نیرویی از سطح جدا می‌شود. اطلاعات مارمولک زنده به صورت نقطه نشان داده شده است. (ب) مدل چسبندگی JKR، بدون اعمال هیچ نیروی برشی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و با افزایش نیروی برشی از راندمان آن کاسته می‌شود. چسبنده‌هایی که براساس این مدل عمل می‌کنند همیشه نیازمندی نیرویی برای جدایش هستند. (ج) مدل چسبندگی کندال دارای توانایی چسبندگی که بستگی به زاویه کنده‌شدن دارد. در این مدل نیاز به نیرویی مشخص جهت کنده‌شدن در نیروی برشی صفر و در هر زاویه ای برای جدایش است [۱۴]

آسیب می‌دیدند و قابلیت استفاده مجدد را از دست می‌دادند.

می‌شود. به زبان ساده‌تر، مارمولک برای جدا شدن پاها، نیروی وزنش را از روی پای مورد نظر جهت جدایش برمی‌دارد.



**شکل ۵:** اولین چسبنده مصنوعی مارمولکی که شامل موهایی در ابعاد زیر میکرومتر از جنس پلی آمید بود [۱۸]

ژونگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶) یک ساختار رشته‌ای زیر میکرونی دیگری گزارش کردند که با ریختن پلی متیل متاکریلات<sup>۳</sup> یا پلی استایرن در قالب‌هایی با چسبندگی سطحی بالا تولید کرده بودند [۱۹]. وقتی این ساختارها از قالب بیرون آمدند کشیده شدند تا به ستون‌هایی با نسبت طول به عرض بالاتری نسبت به حفره قالب برسند.

این ساختارها نیز با AFM تست شدند و حداکثر نیروی ۳۰ نانونیوتن برای آنها ثبت شد که همچنان برای رسیدن به الزامات چسبندگی کافی نبود. یون<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶) ساختارهای PMMA مشابهی تولید کردند که نیروهای چسبنده کمی تولید کردند [۲۰]. آزمایشات اصطکاک نیز روی این نمونه‌ها انجام گرفت که نشان داد نیروی برشی کمتر از ۲ نانونیوتن است. ژائو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۶) نانوتیوب‌های کربنی چنددیواره‌ای<sup>۶</sup> با استفاده از رسوب‌دهی بخار شیمیایی ساختند؛ اما اندازه نمونه‌ها بزرگتر از آن بود که با دستگاه AFM اندازه‌گیری شود [۲۱]. مساحت نمونه‌ها تقریباً ۰/۴ سانتی متر مربع بود و نیروی عمودی به اندازه ۰/۴ نیوتن و نیروی برشی به

## ۴ چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی

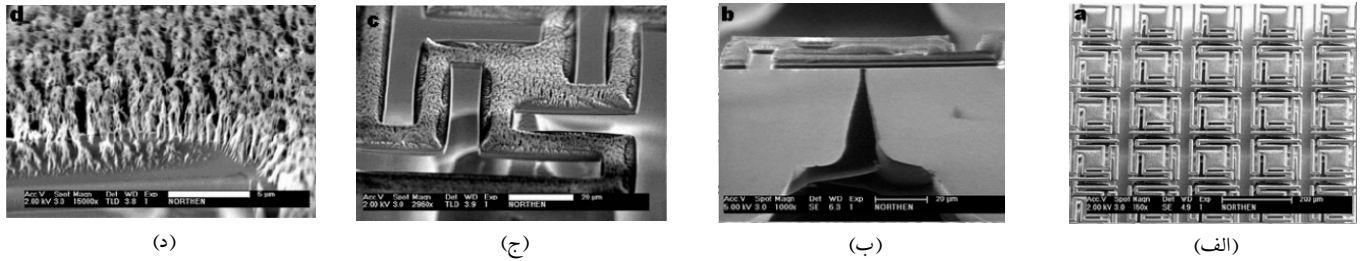
با توسعه ابزارهای پیشرفته ساخت، روش‌های مختلف ساختی برای تولید میکرو / نانو ساختارهایی که از توانایی پاهای مارمولک جهت چسبیدن به دفعات زیاد روی هر سطحی حین بالارفتن تقلید کنند، بررسی شدند. برای نیل به این هدف، بعضی از روش‌های لیتوگرافی استفاده شدند که شامل لیتوگرافی سنتی فرابنفش، لیتوگرافی پرتو الکترونی<sup>۱</sup> و ساخت لایه به لایه می‌باشد. بقیه روش‌ها مانند ماشینکاری پرتو یونی متمرکز شده (FIB)، نانولایه‌نشانی و کولپلیمرهای خودمونتاژ نیز ارائه شدند. ریختن پلیمر در مواد نانو متخلخل و ماشینکاری قالب‌ها با استفاده از ابزارهایی در مقیاس میکرو نیز به نتایج جالبی رسیدند. تکنیک‌های الگوسازی سطوح پلیمری در مقیاس ماکرو و نانو در [۱۷] به صورت خلاصه آمده است. تعدادی از این روش‌های ساخت چسبنده‌های مارمولکی در ادامه آمده است.

### ۱.۴ رشته‌های زیر میکرونی

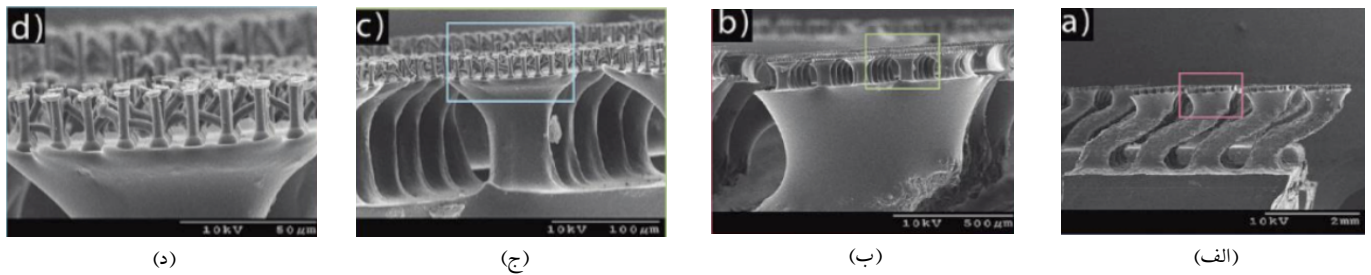
اولین چسبنده مصنوعی مارمولکی در شکل ۵ نمایش داده شده است. این چسبنده شامل ردیف‌هایی از موهای پلی آمیدی در ابعاد زیر میکرون است که با لیتوگرافی پرتو الکترونی تولید شده و در پلاسمای اکسیژن بصورت خشک اچ شده‌اند [۱۸]. اگرچه نتایج این روش ساخت به الزامات چسبنده‌های بالا رونده (کنترل‌پذیری، قابلیت استفاده مجدد، انطباق با سطوح، توزیع یکنواخت نیرو) نرسید؛ اما شروع موجی از پژوهش‌ها درباره چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی بود. محدودیت اصلی این تلاش اولیه این بود که نیازمند نیروی پیش بار زیادی بود تا تعداد قابل توجهی از موهای مصنوعی با سطح درگیر شوند. در طول فاز اعمال پیش بار تعداد زیادی از رشته‌های مصنوعی

<sup>1</sup>e-beam <sup>2</sup>Jeong <sup>3</sup>PMMA <sup>4</sup>Yoon <sup>5</sup>Zhao <sup>6</sup>MWCNT

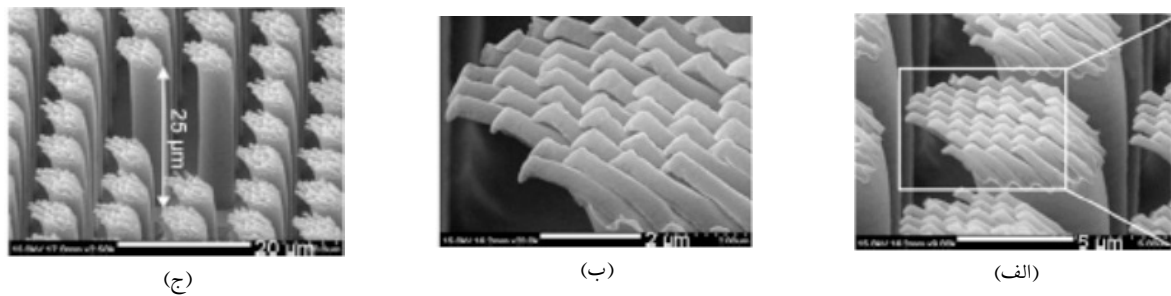




شکل ۶: ساختار معلق و سلسله‌مراتبی سیلیکونی نورتن که نشان‌دهنده انطباق بهتر با سطوح و نسبت نیروی کنده‌شدن به پیش‌بار بیشتری است [۲۳]



شکل ۷: ساختار سلسله‌مراتبی با سرهای قارچی سه‌سطحی که سطح انطباق را افزایش قابل ملاحظه‌ای داد [۲۴]



شکل ۸: ساختار دومرحله‌ای سلسله‌مراتبی ساخته‌شده توسط ژئونگ [۲۵]

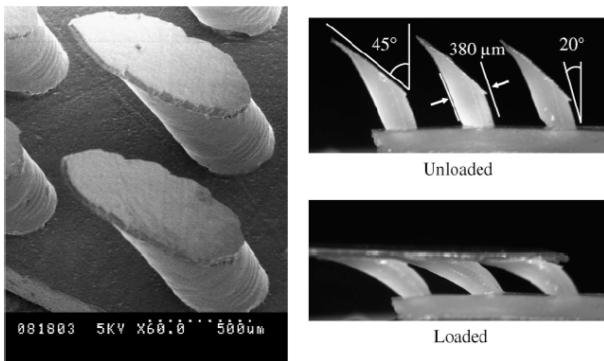
سطوح توازنی برقرار ساخت. هرچه رشته‌ها کوچک شوند، بیشتر به صافی سطوح حساس می‌شوند و به آسانی با سطوح منطبق نمی‌شوند. برای حل این مشکل یک ساختار معلق سلسله‌مراتبی ضروری است تا بتواند انطباق را برقرار ساخته و یک محدوده بزرگتری از حرکت را در حالی که بارگذاری شده است تأمین کند. نخستین بار نورتن و همکاران (۲۰۰۵) به حل این مشکل پرداختند [۲۳]. آنها یک ساختار معلق سلسله‌مراتبی را که در شکل ۶ نمایش داده شده است، ساختند. اضافه‌شدن دومین سطح به چسبیده قابلیت آن را جهت انطباق با سطوح افزایش داد. ضریب چسبندگی  $\mu$  که نسبت نیروی عدم اتصال به نیروی پیش‌بار اعمالی تعیین شده بود، با اضافه‌شدن ساختار معلق ۵ برابر شد. با این‌وجود این چسبنده کنترل‌پذیر نبوده و قابلیت استفاده مجدد را نداشت. مورفی و همکاران (۲۰۰۹) ساختارهای دو و سه‌سطحی سلسله‌مراتبی را ساختند [۲۴]. این ساختارها، که دارای سرهای قارچی بود، قطری در حد چندصد میکرون داشتند که روی آنها دو سطح دیگر از ساختارهای کوچکتر با ابعاد ۵۰ و ۳ میکرومتر قرار داشتند. شکل ۷ این ساختار سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد. سومین چسبنده سلسله‌مراتبی توسط ژئونگ و همکاران (۲۰۰۹) ساخته شد که موهای ۲۵ میکرومتری زاویه‌دار را

اندازه ۳/۵ نیوتن را تحمل کردند. یک چسب MWCNT جدیدتر نیز عملکرد چشمگیری با ساخت آرایه‌هایی از نانولوله‌هایی که سرهایی با اشکال درهم داشت، نشان داد [۲۲]. این سرهای بدون ساختار با کشیده‌شدن در هر جهتی، جهت‌دار شده و نیروی برشی چسبندگی بالایی را ایجاد می‌کردند. به‌عنوان مثال یک چسبنده با سطح مقطع ۰/۱۶ سانتی‌متر مربع یک کتاب با جرم ۱۴۸۰ گرم را نگه می‌داشت. این چسبنده‌ها نیازمند نیروی پیش‌بار متوسطی جهت دستیابی به این نیروها بوده، اما قابلیت استفاده مجدد در چندین تست بدون هیچ افت توانایی چسبندگی را نداشتند. این راستای سرهای درهم همچنین به چسبنده اجازه داد تا از یک سطح بصورت نرمال با نیروی تقریباً ۵ برابر کمتر از آنکه نیاز بود جدا شود. این پیشرفت حرکتی به‌سمت نیازمندی قابلیت کنترل برای چسبنده‌های بالا رونده بود و این پدهای چسبنده همچنین قابلیت استفاده مجدد هم داشتند.

## ۲.۴ چسبنده‌های رشته‌ای سلسله‌مراتبی

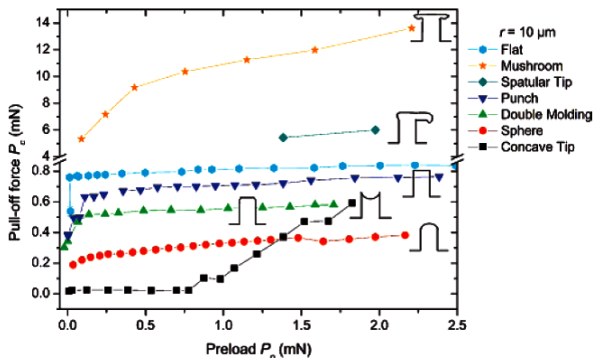
ساختارهای زیرمیکرونی مانند چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی موضوعی جذابند. با این‌وجود باید بین سایز رشته و توانایی آن جهت انطباق با تغییرات

را می‌داد که از شیشه‌های عمودی بتواند بالا برود. با اینحال این چسبنده فاقد ساختاری به اندازه کافی کوچک برای چسبیدن به سطوح با زبری میکرونی مانند فلز، چوب و دیوار رنگ شده بود.



**شکل ۱۰:** کیم و همکاران ساقه‌های زاویه‌دار با قطر ۳۸۰ میکرومتر و نوک تیز ساختند که چسبندگی جهت‌دار را به نمایش می‌گذاشت و به ربات‌های صعودکننده اجازه می‌داد که از دیوار بالا روند [۲۸]

کامپو و همکاران (۲۰۰۷) مطالعاتی درباره تأثیر انواع شکل‌های سر در چسبنده‌ها داشتند [۳۲]. ستون‌هایی با ۴ شعاع متفاوت از ۲/۵ میکرومتر تا ۲۵ میکرومتر با ۷ نوع شکل متفاوت سر شامل تخت، کروی و قارچی ساخته شدند. این چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی متفاوت تست شدند تا مشخص شود کدام پارامتر مربوط به مشخصه سرهای ساقه چسبنده روی نیروی چسبندگی تأثیر دارند. در این مطالعه ساختارهای قارچی شکل روی سطح شیشه بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. نتایج این آزمایشات در شکل ۱۱ خلاصه شده است.

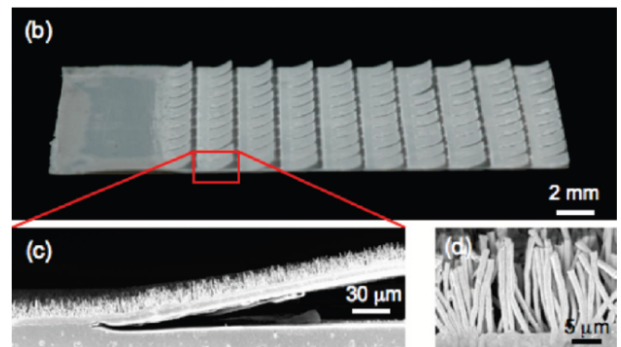


**شکل ۱۱:** تأثیر شکل سر رشته‌های چسبنده بر نیروی چسبندگی [۳۲]

یک ساختار ستونی مستقیم ساده با پایه مربعی به عرض ۱۸ میکرومتر در [۲۹] ساخته و تست شد. با وجود اینکه چسبندگی قابل توجهی با این ساقه‌ها به دست نیامد، اما بقیه نتایج نشان دادند که یک ستون که بخشی از یک دسته است، استحکام چسبندگی‌اش را به دلیل تغییرات در استحکام اتصال ستون‌ها به واسطه غیریکنواختی ساخت و زبری سطح از دست می‌دهد. یک چسبنده مصنوعی با رشته به قطر ۴۰ میکرومتر و ارتفاع ۱۰۰ میکرومتر روی یک ربات بالا رونده در [۳۰] نشان داده شد. این ساقه‌های پلی وینیل سیلکساین (PVS) اولین چسبنده‌های مصنوعی بودند که اندازه‌ای در حد چند ده میکرومتر داشتند، اما عملکرد قابل اعتمادی نداشتند. چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی بعدی با ساختار در حد چند ده میکرومتر عملکرد بهتری

با ستون‌های کج و نوک‌های برآمده ترکیب کرد [۲۵]. این ساختارها با کمک یک متوقف‌کننده اچ سیلیکونی و قفس فارادی اچ شدند. عملکرد ساختار نشان داده شده در شکل ۸ روی سطوح زبر به دلیل توانایی انطباق لایه‌های معلق سلسله‌مراتبی با سطوح بهبودیافته است. این ساختار جهت‌دار معلق رشته‌ای به توزیع نیرو نیز کمک می‌کند. یک نمونه ۹ سانتی‌متر مربعی از این چسبنده قادر به بلندکردن یک شیشه مانتیور با وزن تقریبی ۱ کیلوگرم شد. هندسه جهت‌دار این ساختار یک روش خوب کنترلی را نشان داد.

فیرینگ و همکاران یک سیستم سلسله‌مراتبی با استفاده از رشته‌های سفت پلی پروپیلن ساختند و با استفاده از انواع پلیمرها و لایه‌چینی متعدد، ورق‌هایی مانند لملا مارمولک ساختند. یک نمونه دو سانتی‌متر مربعی، که در شکل ۹ نمایش داده شده است، قادر بود وزنه ۵۰ گرمی را روی سطوح عمودی شیشه‌ای نگه دارد [۲۶]. به واسطه طبیعت جهت‌دار، این ساختار قابل کنترل و استفاده مجدد بود. این ساختار سلسله‌مراتبی روی یک سطح با زبری خاص منطبق می‌شد.



**شکل ۹:** فیرینگ و همکاران موهای زیرمیکرونی پلی پروپیلنی با ریختن داخل یک فیلتر پلی کربنات ساختند [۲۶]

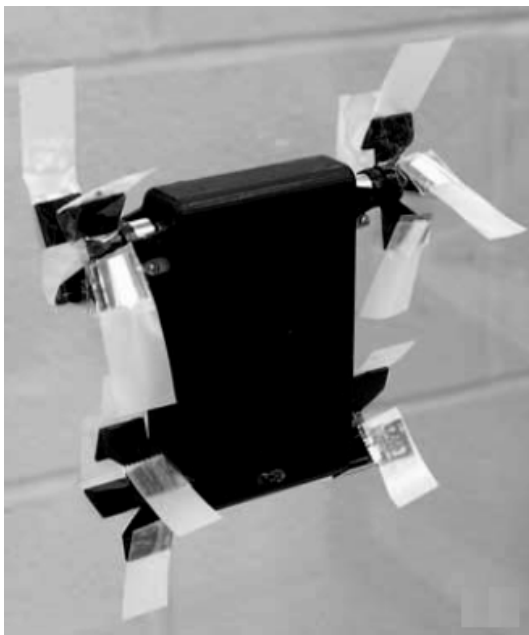
### ۳.۴ رشته‌های میکرونی سازگار برای صعود

ایده دیگر برای رسیدن به چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی قابل استفاده براساس اندازه‌های بزرگتر ساقه‌ها و استفاده از چسبندگی قوی‌تر با استفاده از پلیمرهای نرم‌تر است. دایی و همکاران روی پارامترهای مواد چسبنده رشته‌ای کار کردند و نشان دادند که مدول الاستیک نرم‌تر منجر به سطوح بالاتری از چسبندگی می‌شود [۲۷]. بزرگترین این چسبنده‌های رشته‌ای برای ربات‌های چسبنده ساخته شد [۲۸]. این رشته‌ها با ریختن در یک قالب سه‌تکه ساخته‌شده توسط یک دستگاه CNC سه‌محوره ساخته شدند. یک پلیمر بسیار نرم با مدول یانگ ۶۶۰ کیلوپاسکال برای استفاده از در این رشته‌ها استفاده شد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. رشته‌های اصلی ۳۸۰ میکرومتر قطر داشتند و نسبت به محور عمودی ۲۰ درجه زاویه داشتند. نوک این ساقه‌ها با زاویه ۴۵ درجه پخ زده شده و به یک سر تیز ختم می‌شد. ارتفاع عمودی این ساختار کمی بیش از ۱ میلی‌متر بود. چسبنده‌های ۴ سانتی‌متر مربعی این مواد تست شدند که نیروی چسبندگی پایداری بیش از ۱ نیوتن به دست آمد. این چسبنده به واسطه هندسه جهت‌دار رشته‌هایش، متناسب با مدل چسبندگی اصطکاکی بود که به آن اجازه می‌داد نیروی چسبندگی نرمال خود را با نیروی برشی کنترل کنند. این خواص به ربات چسبنده این امکان

شد. ساقه‌های با قطر ۳۵ میکرومتر به هندسه ایده‌آل نزدیکتر بوده و نیروی چسبندگی بیشتری از خود نشان دادند. یک چسبنده از این نوع رشته‌ها با سطح مقطع ۱ سانتی‌متر مربع توانست در تست آویزانی وزنه ۱ کیلوگرمی را تحمل کند. جهت توسعه عملکرد این ماده برای محدوده وسیعی از سطوح صاف و نیمه‌صاف، ساختار معلق سلسله‌مراتبی می‌توانست به ساختار سیستم اضافه شود و به چسبنده اجازه انطباق با انواع سطوح را بدهد، ضمن اینکه توزیع نیرو یکنواخت‌تر شده و قابلیت استفاده مجدد نیز بهبود می‌یابد.

## ۵ کاربردهای چسبندگی مارمولکی در سیستم‌های رباتیک و گریپرها

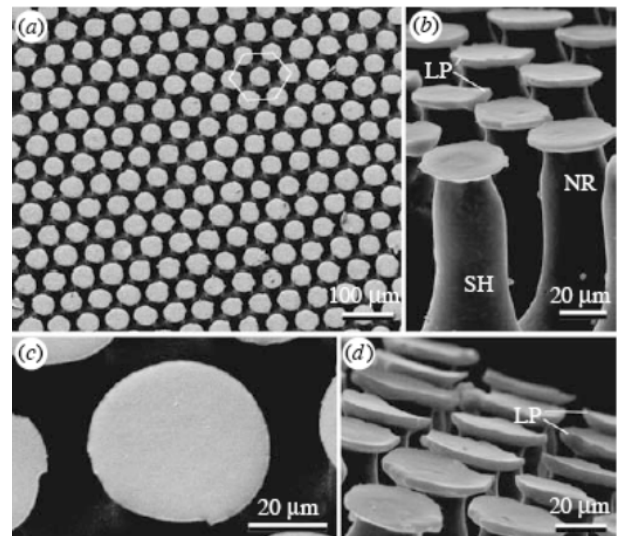
با توسعه چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی، پژوهشگران متعددی از این چسبنده‌ها در سیستم‌های رباتیک و گریپرها استفاده کردند. یک ربات بالارونده از دیوار با استفاده از میکروساختارهای پلیمری در [۳۵] طراحی و ساخته شد. این ربات ۱۳۲ گرمی قادر بود که از دیوارهای عمودی شیشه ای بالا رود (شکل ۱۴).



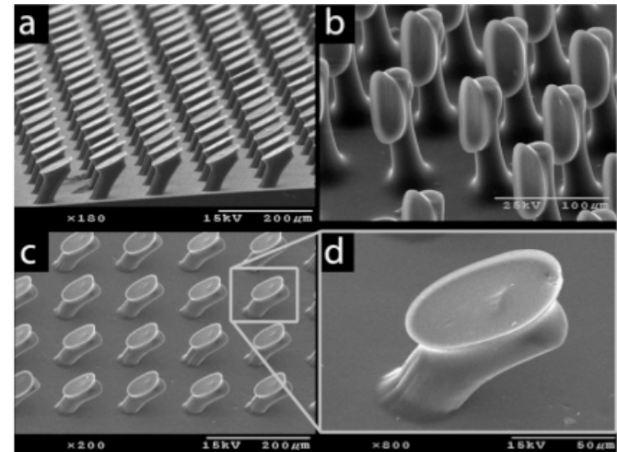
شکل ۱۴: ربات بالارونده از دیوار با استفاده از چسبندگی میکروساختارهای پلیمری [۳۵]

کلانتری و همکاران (۲۰۱۵) کوادروتوری ساختند که قادر به اتصال با دیوارهای عمودی بود. این کوادروتور قادر بود با استفاده از گریپر قرارگرفته روی بدنه‌اش به دیوارهای عمودی بچسبد و یا از روی دیوارهای عمودی به حرکت در آید (شکل ۱۵). حداقل سرعت مورد نیاز برای اتصال به دیواره‌ها در این کوادروتور ۰/۴ متر بر ثانیه بود [۳۶]. مورفی و همکاران (۲۰۱۲) نیز یک ربات بالارونده دیگر بر مبنای چسبندگی مارمولکی ساختند [۳۷]. این ربات ۸۵ گرمی که قادر بود بار تا ۱۰۰ گرم را نیز بر روی خود حمل کند با سرعت حداکثر ۵ سانتی‌متر در ثانیه قادر به بالارفتن از دیوارها بود. چسبنده مورد استفاده در این پژوهش رشته‌های پلیمری با سرهای قارچی شکل بودند که چسبندگی بالایی را تأمین کردند (شکل ۱۶).

در آزمایشات از خود نشان دادند. دومین نسل از رشته‌های چسبنده مارمولکی PVS که شامل ستون‌هایی با سرهای قارچی بودند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ارتفاع این ستون‌ها ۱۰۰ میکرومتر، قطر رشته‌ها ۴۰ میکرومتر و ضخامت قسمت قارچی ۲ میکرومتر بود. این ساختار چسبنده نیروی فشاری چسبندگی بالایی را داشته، به طوری که نمونه با سطح ۰/۷ سانتی‌متر مربع به نیرو چسبندگی پایداری تا ۰/۴ نیوتن رسید [۳۱].



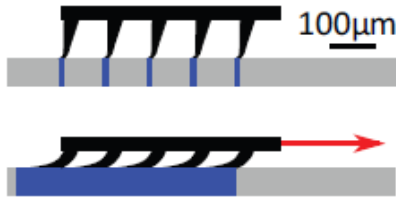
شکل ۱۲: ستون‌های از جنس PVS و سرهای قارچی که فشار چسبندگی بالایی دارند [۳۱]



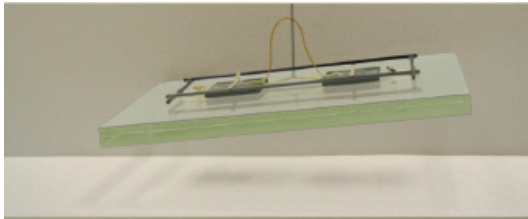
شکل ۱۳: ستون‌های زاویه‌دار با سرهای کفگیر و چسبندگی بالا [۳۴]

یکی دیگر از چسبنده‌های ساخته‌شده شامل ستون‌های پلیمری عمودی و زاویه‌داری بود که ۶ میکرومتر قطر داشت [۳۳]. این رشته‌ها نوک‌های همسطحی داشتند و وقتی بر جهت برشی بارگذاری می‌شدند، با سطح تماس قوی پیدا نمی‌کردند. اما فرایند فروبردن در پلی اورتان توسعه داده شد که در آن نوک ستون‌ها به شکل کروی یا کفگیر مانند درمی‌آمدند [۳۴]. هندسه کفگیری نوک رشته‌ها هم فشار چسبندگی بالا و هم ضریب  $\mu$  کم از خود به نمایش گذاشتند. برای نخستین بار این ساقه‌ها رفتار جهت‌داری از خود نشان دادند که نیازمندی قابلیت کنترل برای یک چسبنده بالارونده را ارضا می‌کرد. بعداً با پیشرفت فناوری تهیه ساقه‌های کفگیری شکل، قابلیت کنترل چسبنده بیشتر توسعه پیدا کرد و رشته‌های غیرهمسطحی مانند شکل ۱۳ تولید

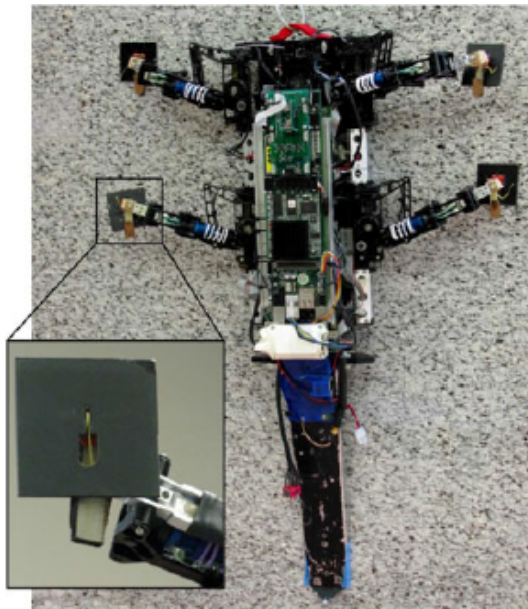




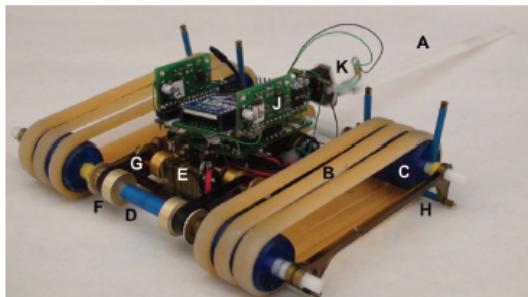
شکل ۱۷: اصول چسبندگی جهت‌دار در گریپر ساخته در مآخذ [۳۸]



شکل ۱۸: گریپر ساخته‌شده در [۳۸] با سازوکار تحریک نخ



شکل ۱۹: ربات بالارونده از دیوار با استفاده از چسبنده های جهت دار [۳۹]



شکل ۲۰: ربات تانکی بالارونده از دیوار با چسبندگی مارمولکی [۴۰]

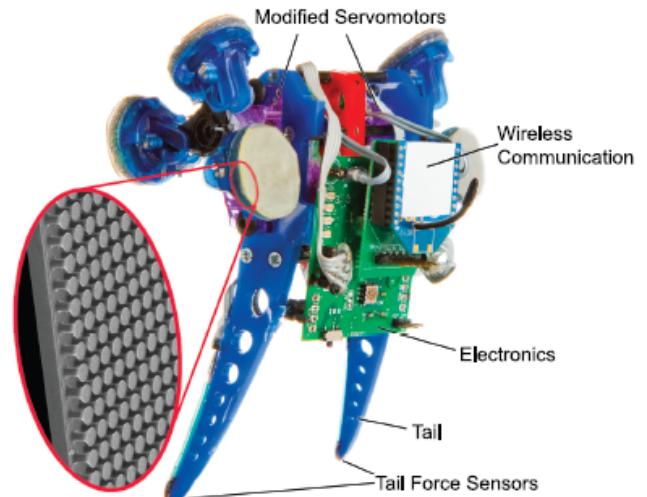
## ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله شکل‌های متنوعی از یک چسبندگی جدید در سیستم‌های رباتیک، با الهام از چسبندگی مارمولکی، برای مقاصد ربات‌های دیوارنورد و گریپرها

یک گریپر با چسبندگی جهت‌دار جهت نقل و انتقال صفحات مسطح توسط الیوت و همکاران (۲۰۱۶) معرفی شد [۳۸]. این پری‌گریپر با استفاده از میکروساختارهای گوه‌ای شکل عمل کرده و با اعمال نیروی برشی به موازات سطح به رشته‌های چسبنده، باعث خوابیده‌شدن ساختارهای چسبنده روی سطح شده و بدین ترتیب نیروی واندروالسی بین چسبنده و سطح افزایش پیدا کرده و چسبنده با نیروی بیشتری به سطح می‌چسبد (شکل ۱۷). نویسندگان این مقاله از یک سازوکار نخ‌نی برای اعمال نیروی برشی به چسبنده گریپر استفاده کردند. الیوت و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از اصول استفاده‌شده در طراحی گریپر قبلی رباتی برای بالارفتن از دیوار ساختند [۳۹]. این ربات با سطح چسبنده ۱۰۰ سانتی‌متر مربع و وزن ۴ کیلوگرم توانایی بالارفتن از دیوارهای گرانیتی را داشت (شکل ۱۹). یک ربات تانکی شکل بالارونده از دیوار با استفاده از چسبندگی مارمولکی در مآخذ [۴۰] ارائه شد. این تانک با حداکثر وزن ۱۵۰ گرم قابلیت حرکت روی سطوح از صفر تا ۳۶۰ درجه را داشت و قابلیت حمل ۳۰۰ گرم بار روی دیوارهای معمولی رنگ شده را نیز داشت (شکل ۲۰).



شکل ۲۱: کوادروتور چسبیده به دیواره شیشه‌ای با چسبندگی مارمولکی گریپر متصل به بدنه [۳۶]



شکل ۲۲: ربات بالارونده از دیوار با استفاده از چسبنده‌های رشته‌ای پلیمری [۳۷]



- [11] A. Russell and V. Bels, Digital hyperextension in anolis sagrei, *Herpetologica*, Vol. 57, pp. 58-65, 2001.
- [12] K. Autumn, W. Hansen, Ultrahydrophobicity indicates a non-adhesive default state in gecko setae, *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology*, Vol. 192, No. 11, pp. 1205-1212, 2006.
- [13] K. Autumn, A. Dittmore, D. Santos, M. Spenko, and M. Cutkosky, Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, No. 18, pp. 3569-3579, 2006.
- [14] K. Johnson, K. Kendall, and A. Roberts, Surface energy and the contact of elastic solids, *Proceeding Royal Society London A.*, Vol. 324, No. 15, pp. 301-313, 1971.
- [15] K. Kendall, Thin-film peeling - elastic term, *Journal of Physic D Applied Physic*, Vol. 8, No. 13, pp. 1449-1452, 1975.
- [16] S. Goyal, A. Ruina, J. Papadopoulos, Limit surface and moment function descriptions of planar sliding, proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, USA, May 14-19, 1989.
- [17] A. del Campo, E. Arzt, Fabrication approaches for generating complex micro-and nanopatterns on polymeric surfaces, *Chemical Review*, Vol. 108, No. 3, pp.911-945, 2008.
- [18] A. K. Geim, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, K. S. Novoselov, A. A. Zhukov, and S. Y. Shapoval, Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair, *Nature Material*, Vol. 2, No. 7, pp. 461-463, 2003.
- [19] H. Jeong, S. Lee, P. Kim, K. Suh, Stretched polymer nanohairs by nanodrawing, *Nano Letters*, Vol. 6, No. 7, pp. 1508-1513, 2006.
- [20] E. Yoon, R. Singh, H. Kong, B. Kim, D. Kim, H. J. K. Suh, Tribological properties of bio-mimetic nano-patterned polymeric surfaces on silicon wafer, *Tribology Letters*, Vol. 21, No. 1, pp.31-37, 2006.
- [21] Y. Zhao, T. Tong, L. Delzeit, A. Kashani, M. Meyyappan, Interfacial energy and strength of multiwalled-carbon-nanotube-based dry adhesive, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 331-335, 2006.
- [22] L. Qu, L. Dai, M. Stone, Z. Xia, Z. Wang, Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting, *Science*, Vol. 322, pp. 238-242, 2008.
- [23] M. T. Northen, K. L. Turner, A batch fabricated biomimetic dry adhesive, *Nanotechnology*, Vol. 16, No. 8, pp. 1159-1166, 2005.
- [24] M. Murphy, S. Kim, M. Sitti, Enhanced adhesion by gecko-inspired hierarchical \_brillar adhesives, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 1, No. 4, pp. 849-855, 2009.
- [25] H. E. Jeong, J.-K. Lee, H. N. Kim, S. H. Moon, K. Y. Suh, A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs, *Proceeding National Academic Science USA*, Vol. 106, No. 14, pp. 5639-44, 2009.
- [26] J. Lee, B. Bush, R. Maboudian, R. Fearing, Gecko-inspired combined lamellar and nano brillar array for adhesion on nonplanar surface, *Langmuir*, Vol. 25, No. 21, pp. 449-453, 2009.

معرفی شد. این چسبنده‌های مارمولکی مصنوعی به امید یک جایگزین برای سیستم‌های سنتی ساخته شده‌اند. ساخت این چسبنده‌ها پیچیده و گران نبوده و برای عملکرد خود نیازمند منبع توان خارجی نیستند و هیچ آلودگی تولید نمی‌کنند. اگرچه نیروی چسبندگی چسبنده‌های مصنوعی مارمولکی در مقایسه با چسبنده‌های غیرمارمولکی مانند سیستم‌های مکشی و مغناطیسی کمتر است؛ اما این سیستم‌های سنتی در مقایسه با چسبنده‌ای مارمولکی محدودیت زیادی در زبری سطوح، جنس مواد و محیط عملکرد دارند. موارد متعددی از کاربرد موفقیت‌آمیز این چسبنده‌های جدید در ربات‌های دیوارنورد و گریپرها نشان داده شدند. روند کاربرد این چسبنده‌های مارمولکی در صنعت روبه گسترش بوده و گریپرهایی با چسبندگی مارمولکی در حال استفاده در بعضی صنایع و سیستم‌های فضایی هستند.

## مراجع

- [1] B. C. Mahendra, Contribution to the bionomics, anatomy, reproduction and development of the Indian house-gecko, hemidactylus aviviridis. the problem of locomotion, *Proceedings of the Indian Academy of Science*, Vol. 4, pp. 288-306, 1941.
- [2] P. Maderson, Keratinized epidermal derivatives as an aid to climbing in gekkonid lizards, *Nature*, Vol. 203, pp. 780-781, 1964.
- [3] K. Autumn, Y. A. Liang, S. T. Hsieh, W. Zesch, W. P. Chan, T. W. Kenny, R. Fearing, and R. J. Full, Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature*, Vol. 405, No. 6787, pp. 681-685, 2000.
- [4] K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J. N. Israelachvili, R. J. Full, Evidence for van der waals adhesion in gecko setae, *Proceeding National Academic Science USA*, Vol. 99, No. 19, pp. 252-256, 2002.
- [5] A. Russell, M. Johnson, S. Delannoy, Insights from studies of gecko inspired adhesion and their impact on our understanding of the evolution of the gekkotan adhesive system, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 21, No. 12-13, pp. 1119-1143, 2007.
- [6] A. Russell, Integrative functional morphology of the gekkotan adhesive system (reptilia: Gekkota) 1, *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 42, No. 6, pp. 1154-1163, 2002.
- [7] K. Autumn, Gecko adhesion: structure, function, and applications, *MRS Bulletin*, Vol. 32, pp. 473-478, 2007.
- [8] K. Autumn, A. Peattie, Mechanisms of adhesion in geckos, *Integrated Computational Biology*, Vol. 42, pp. 1081-1090, 2002.
- [9] R. Ruibal, V. Ernst, The structure of the digital setae of lizards, *Journal of Morphology*, Vol. 117, No. 3, 1965.
- [10] N. Rizzo, K. Gardner, D. Walls, N. Keiper-Hrynko, T. Ganzke, D. Hallahan, Characterization of the structure and composition of gecko adhesive setae, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 3, No. 8, pp. 441-451, 2005.

- [27] Z. Dai, M. Yu, S. Gorb, Adhesion characteristics of polyurethane for bionic hairy foot, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No.8-9, pp. 737-741, 2006.
- [28] D. Santos, M. Spenko, A. Parness, S. Kim, M. Cutkosky, Directional adhesion for climbing: theoretical and practical considerations, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 21, No. 12-13, pp. 1317-1341, 2007.
- [29] C. Hui, A. Jagota, L. Shen, A. Rajan, N. Glassmaker, Design of bioinspired brillar interfaces for contact and adhesion|theory and experiments, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 22, No. 14, pp.1456-1460, 2007.
- [30] K. Daltorio, A. Horchler, S. Gorb, R. Ritzmann, R. Quinn, A small wallwalking robot with compliant, adhesive feet, *Proceedings IEEE IRS*, 2005.
- [31] S. Gorb, M. Varenberg, A. Peressadko, and J. Tuma, Biomimetic mushroomshaped \_brillar adhesive microstructure, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 4, No. 13, pp. 271-275, Oct 2006.
- [32] A. del Campo, C. Greiner, E. Arzt, Contact shape controls adhesion of bioinspired brillar surfaces, *Langmuir*, Vol. 21, No. 12, pp. 234-240, 2007.
- [33] B. Aksak, M. P. Murphy, and M. Sitti, Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer micro\_ber arrays, *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, Vol. 23, No. 6, pp. 3322-32, 2007.
- [34] M. Murphy, B. Aksak, M. Sitti, Adhesion and anisotropic friction enhancements of angled heterogeneous micro\_ber arrays with spherical and spatular tips, *Journal of Adhesion Science and Technol*, Vol. 21, No. 12-13, pp. 1281-1296, 2007.
- [35] A Kathryn, Daltorio and Stanislav Gorb, A Robot that Climbs Walls using Micro-structur Polymer Feeet, In proceeding of 8th international conference on climbing and walking robots, UK, 2005.
- [36] Arash Kalantari, Karan Mahajan, Donald Ruffatto and Matthew Spenko, Autonomous Perching and Take-off on Vertical Walls for a Quadrotor Micro Air Vehicle, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, USA, May 26-30, 2015
- [37] Michael P. Murphy, Casey Kute, Yigit Mengüç and Metin Sitti, Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 30, No. 1, pp.118-133.2012.
- [38] Elliot W. Hawkes, Hao Jiang, Mark R. Cutkosky, Three-dimensional dynamic surface grasping with dry adhesion, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35, No.8, pp.943-958, 2016.
- [39] Elliot W. Hawkes, Eric V. Eason, Alan T. Asbeck, Mark R. Cutkosky, The Gecko's Toe: Scaling Directional Adhesives for Climbing Applications, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 18, No. 2, 2013.
- [40] Ozgur Unver, Metin Sitti, Tankbot: A Palm-size, Tank-like Climbing Robot using Soft Elastomer Adhesive Treads, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 14, pp. 1761-1777, 2010.